

ANALISIS *NONLINIER STATIC PUSHOVER* STRUKTUR GEDUNG BERTINGKAT *SOFT STORY* DENGAN MENGGUNAKAN MATERIAL BETON BERTULANG DAN BETON PRATEGANG PADA BALOK BENTANG PANJANG

oleh :

Galih Pramudhita

Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Jakarta

Email : pramudhitagalih22@gmail.com

Haryo Koco Buwono

Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Jakarta

Email : haryo.hkb@ftumj.ac.id

Abstrak : Indonesia merupakan negara yang berada di jalur gempa pasifik (*Circum Pacific Earthquake Belt*) dan jalur gempa Asia (*Trans Asiatic Earthquake Belt*) sehingga tingkat risiko terjadinya gempa bumi sangatlah tinggi. Dengan risiko terjadinya gempa yang sangat tinggi ini, maka sangat tinggi pula risiko kerusakan bangunan yang akan terjadi. Dalam konteksnya terhadap ruang lingkup kerja teknik sipil, kondisi tersebut berpengaruh besar dalam perencanaan desain struktur bangunan. Struktur gedung dalam suatu perencanaan struktur dibagi menjadi dua yaitu struktur gedung beraturan dan struktur gedung tak beraturan. Pada standar perencanaan struktur gedung tahan gempa Indonesia, salah satu definisi struktur gedung tak beraturan adalah terdapat sistem struktur tingkatan lunak (*soft story*) dalam arah vertikal. Dalam perencanaan ini, kinerja bangunan terhadap gempa dan pola keruntuhannya dapat dinyatakan secara jelas dalam bentuk kurva menggunakan *Nonlinear Static Pushover Analysis*. *Nonlinear Static Pushover Analysis* menghasilkan kurva kapasitas yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar terhadap perpindahan titik acuan pada atap. Hasil analisis menunjukkan struktur beton bertulang akan terjadi gaya geser yang lebih besar pada balok bentang panjang sedangkan beton prategang akan lebih kecil karena beton prategang dapat meminimalisir gaya geser.

Kata kunci : *Nonlinear Static Pushover Analysis, soft story, beton prategang, beton bertulang, gaya geser dasar, simpangan, kinerja struktur.*

Abstract : Indonesia is a country that is on the Pacific Earthquake Belt and the Trans Asiatic Earthquake Belt so that the risk of earthquakes is very high. With the high risk of earthquake, the risk of building damage is very high too. In the context of the scope of civil engineering work, these conditions have a major effect on the design of building structure. The building structure in a structural plan consists of two types, namely the structure of regular buildings and irregular building structures. In the standard planning for earthquake resistant buildings in Indonesia, one of the definitions of irregular building structures there is a soft story system in the vertical direction. In this plan, the performance of the building against the earthquake and its collapse pattern can be clearly stated in the form of a curve using *Nonlinear Static Pushover Analysis*. The *Nonlinear Static Pushover Analysis* produces a capacity curve that describes the relationship between the base shear force to the displacement of the reference point on the roof. The results of the analysis show that reinforced concrete structures will have a greater shear force in long span beams while prestressed concrete will be smaller because prestressed concrete can minimize shear forces.

Keywords : *Nonlinear Static Pushover Analysis, soft story, prestressed concrete, reinforced concrete, base shear, displacement, structural performance.*

Pendahuluan

Indonesia merupakan negara yang berada di jalur gempa pasifik (*Circum Pacific Earthquake Belt*) dan jalur gempa Asia (*Trans Asiatic Earthquake Belt*) sehingga tingkat risiko terjadinya gempa bumi sangatlah tinggi. Dengan risiko terjadinya gempa yang sangat tinggi ini, maka sangat tinggi pula risiko kerusakan bangunan yang akan terjadi. Dalam konteksnya terhadap ruang lingkup kerja teknik sipil, kondisi tersebut berpengaruh besar dalam perencanaan desain struktur bangunan.

Pada saat ini metode perencanaan bangunan tahan gempa yang sering digunakan adalah perencanaan berbasis kinerja atau *performance based design*. Dalam perencanaan ini, kinerja bangunan terhadap gempa dan pola keruntuhannya dapat dinyatakan secara jelas dalam bentuk kurva menggunakan *Nonlinear Static Pushover Analysis* atau Analisis Beban Dorong Statik. Struktur gedung dalam suatu perencanaan struktur dibagi menjadi dua yaitu struktur gedung beraturan dan struktur gedung tak beraturan. Pada standar perencanaan struktur gedung tahan gempa Indonesia, salah satu definisi struktur gedung tak beraturan adalah terdapat sistem struktur tingkatan lunak (*soft story*) dalam arah vertikal. *Soft story* didefinisikan sebagai suatu tingkat dimana kekakuan lateralnya kurang dari 70 persen kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 persen kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.

Pada studi ini akan membahas dan membandingkan perilaku struktur gedung bertingkat *soft story* akibat beban gempa pada balok bentang panjang menggunakan material beton bertulang dan beton prategang.

Dari hasil analisis akan diperoleh gaya geser dasar maksimum dan simpangan maksimum

yang dapat ditahan oleh balok beton bertulang dan beton prategang yang akan digunakan untuk membandingkan kinerja tiap material dalam menahan gaya dalam yang bekerja akibat gempa rencana.

Kelebihan dan Kekurangan Beton Bertulang dengan Beton Prategang

Kelebihan beton bertulang adalah sebagai berikut:

1. Beton bertulang mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap api dan air, bahkan merupakan bahan struktur yang terbaik untuk bangunan yang banyak bersentuhan dengan air.
2. Beton mempunyai kuat tekan yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan bahan lain.
3. Struktur beton bertulang sangat kokoh.
4. Beton bertulang tidak memerlukan biaya pemeliharaan yang tinggi
5. Usia layan beton bertulang lebih panjang dibandingkan dengan bahan lain.
6. Beton bertulang mudah dicetak menjadi bentuk yang sangat beragam, mulai dari pelat, balok, dan kolom yang sederhana sampai atap kubah dan cangkang besar.
7. Harga yang lebih ekonomis dibandingkan dengan bahan lain.

Kekurangan beton bertulang adalah sebagai berikut:

1. Beton memiliki kuat tarik yang sangat rendah, sehingga beton membutuhkan penggunaan tulangan tarik.
2. Dalam pengerjaannya memerlukan bekisting untuk menahan beton tetap di tempatnya sampai beton tersebut mengeras.
3. Rendahnya kekuatan persatuan berat dari beton mengakibatkan beton bertulang menjadi berat. Hal ini sangat berpengaruh pada struktur-struktur bentang panjang dimana berat beban

mati beton yang besar akan sangat mempengaruhi momen lentur.

4. Rendahnya kekuatan persatuan volume juga mengakibatkan beton berukuran relatif lebih besar.
5. Sifat beton sangat bervariasi karena bervariasinya proporsi campuran dan pengadukannya.

Kelebihan beton prategang adalah sebagai berikut:

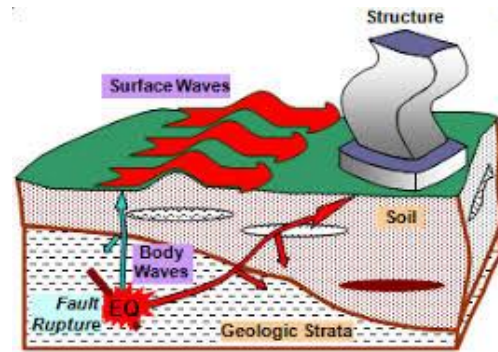
1. Dapat memikul beban lentur yang lebih besar dari beton bertulang.
2. Dapat dipakai pada bentang yang panjang.
3. Ketahanan geser dan puntirnya lebih besar dari beton bertulang.

Kekurangan beton prategang adalah sebagai berikut:

1. Beton prategang memerlukan peralatan khusus seperti tendon, angkur, mesin penarik kabel, dan lain-lain.
2. Memerlukan keahlian khusus baik dalam perencanaan maupun pelaksanaannya.

Konsep Dasar Mekanisme Gempa

Gempa bumi adalah bergetarnya permukaan tanah karena pelepasan energi secara tiba-tiba akibat dari pecah/slipnya massa batuan di lapisan kerak bumi. Hal ini disebabkan karena gerakan pelat-pelat tektonik (lempeng bumi) atau lapis kerak bumi yang saling bertumbukan, bergeser atau saling menyusup satu dengan yang lain (subduksi). Dari pusat gempa, gelombang energi akan merambat ke segala arah yang salah satu arahnya adalah melewati permukaan tanah. Sebelum mencapai alat pencatat, gelombang gempa akan melewati bermacam-macam kondisi lapisan tanah, sebagian gelombang akan dipantulkan, dibiaskan, dan ada pula yang bergerak sepanjang permukaan tanah sebagaimana yang tampak pada gambar berikut.



Gambar 1. Skema penyebaran gelombang energi gempa

Respon Struktur Terhadap Gempa

Struktur gedung saat menerima beban gempa akan memikul gaya geser dasar (*base shear*). Base shear tiap lantai merupakan fungsi dari massa (m) dan kekakuan (k) dari tiap lantai tersebut. Base shear mengakibatkan lantai bergeser (*displacement*) dari kedudukan semula.

Saat gaya gempa bekerja, maka gedung akan merespon beban gempa tersebut dengan memberikan gaya-gaya dalam. Apabila gaya-gaya dalam tersebut melebihi kemampuan/kapasitas gedung, maka gedung akan berperilaku inelastik apabila sifat struktur cukup daktail tetapi akan langsung hancur apabila kurang daktail.

Agar struktur bangunan mempunyai kemampuan yang cukup dan tidak terjadi keruntuhan pada saat terjadi Gempa Kuat, maka dapat dilakukan dua cara sebagai berikut :

- a) Membuat struktur bangunan sedemikian kuat, sehingga struktur bangunan tetap berperilaku elastis pada saat terjadi Gempa Kuat. Struktur bangunan yang didesain tetap berperilaku elastis pada saat terjadi Gempa Kuat, disebut Struktur Tidak Daktail. Penggunaan sistem struktur portal tidak daktail masih dianggap ekonomis untuk bangunan gedung bertingkat menengah dengan ketinggian tingkat antara 4 s/d 7 lantai,

dan terletak pada wilayah dengan pengaruh kegempaan ringan sampai sedang.

- b) Membuat struktur bangunan sedemikian rupa sehingga mempunyai batas kekuatan elastis yang hanya mampu menahan Gempa Sedang saja. Jadi struktur ini masih bersifat elastis pada saat terjadi Gempa Ringan atau Gempa Sedang. Pada saat terjadi Gempa Kuat, struktur bangunan harus dirancang agar mampu untuk berdeformasi secara plastis. Jika struktur mempunyai kemampuan untuk dapat berdeformasi plastis cukup besar, maka hal ini dapat mengurangi sebagian dari energi gempa yang masuk ke dalam struktur.

Spektrum Respon Desain

Pada SNI 03-1726-2012, grafik respon spektrum harus dirancang menggunakan parameter percepatan-percepatan yang berbeda-beda untuk setiap wilayah gempa dan klasifikasi situs tanah dimana bangunan berdiri. Kurva spektrum respon desain dibentuk setelah mendapat nilai S_{DS} dan S_{D1} , dengan mengacu pada ketentuan berikut: Untuk perioda yang kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan disain, S_a , harus diambil dari persamaan:

$$S_a = S_{DS} (0,4 + 0,6T/T_0) \quad (1)$$

Untuk perioda lebih besar dari T_s , spektrum respons percepatan disain, S_a diambil menurut persamaan:

$$T_0 = 0,2 S_{D1}/S_{DS} \quad (2)$$

$$T_s = S_{D1}/S_{DS} \quad (3)$$

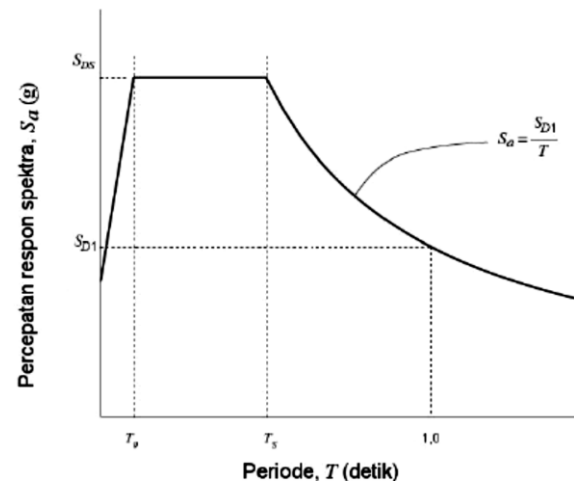
$$S_a = S_{D1}/T \quad (4)$$

Keterangan:

S_{DS} = parameter respons spektral percepatan desain pada perioda pendek.

S_{D1} = parameter respons spektral percepatan desain pada perioda 1 detik.

T = perioda getar fundamental struktur



Gambar 2. Spektrum Respon Desain

Simpangan Antar Lantai

Pada proses perencanaan struktur, simpangan lateral antar tingkat (*story drift*) harus selalu diperiksa untuk menjamin stabilitas struktur dan mencegah kerusakan elemen-elemen struktur.

Penentuan simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau.

Defleksi pusat massa di tingkat x (δ_x) harus ditentukan sesuai dengan persyaratan dari SNI 1726-2012 sebagai berikut :

$$C_d \Delta x_i / I_e < \Delta a \dots \dots \dots (5)$$

Dengan :

$$\Delta a = 0.02 h_i$$

C_d = faktor pembesaran defleksi

I_e = faktor keutamaan gempa

Δx_i = simpangan antar tingkat

Berdasarkan SNI 03-1726-2012 simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat ijin (Δa) seperti didapatkan dari Tabel 1 untuk semua tingkat.

Tabel 1. Simpangan Izin antar lantai, Δ_a

Struktur	Kategori Resiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar lantai tingkat.	0.025 h_{ex}	0.020 h_{ex}	0.015 h_{ex}
Struktur dinding geser kantilever batu bata	0.010 h_{ex}	0.010 h_{ex}	0.010 h_{ex}
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0.007 h_{ex}	0.007 h_{ex}	0.007 h_{ex}
Semua struktur lainnya	0.020 h_{ex}	0.015 h_{ex}	0.010 h_{ex}

Nonlinear Static Pushover Analysis

Nonlinear Static Pushover Analysis merupakan prosedur analisis untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa, dikenal pula sebagai analisis beban dorong statik. Analisis ini memerlukan komputer program untuk dapat merealisasikannya pada bangunan nyata. Beberapa program komputer komersil yang tersedia adalah SAP2000, ETABS, GTSrudl, Adina, dan Tekla.

Tujuan *Nonlinear Static Pushover Analysis* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi serta untuk memperoleh informasi bagian mana saja yang kritis. Selanjutnya dapat diidentifikasi bagian-bagian mana saja yang memerlukan perhatian khusus untuk pendetailan atau stabilitasnya.

Analisis dilakukan dengan memberikan suatu pola beban lateral statik pada struktur, yang kemudian secara bertahap ditingkatkan dengan faktor pengali sampai satu target perpindahan lateral dari suatu titik acuan tercapai. Biasanya titik tersebut adalah titik pada atap, atau lebih tepat lagi adalah pusat massa atap.

Nonlinear Static Pushover Analysis menghasilkan Kurva *Pushover*, kurva yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (V) terhadap perpindahan titik acuan pada atap (D).

Kurva *Pushover* dipengaruhi oleh pola distribusi gaya lateral yang digunakan

sebagai beban dorong. Kurva *Pushover* akan memperlihatkan suatu kondisi linier sebelum mencapai kondisi leleh dan selanjutnya berperilaku non-linier.

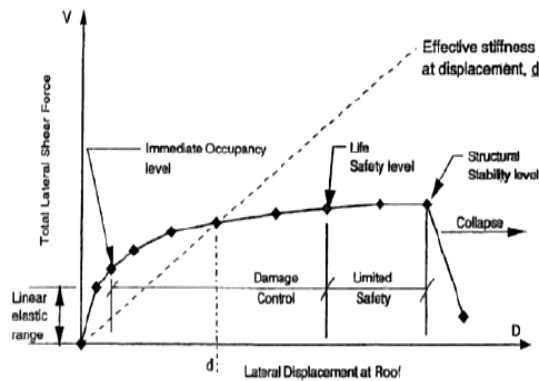
Level Kinerja

Sasaran kinerja terdiri dari kejadian gempa rencana yang ditentukan (*earthquake hazard*) dan level kinerja (*performance level*) dari bangunan terhadap kejadian gempa tersebut. *Performance level* disini adalah tingkat atau derajat kerusakan yang ditentukan oleh kerusakan fisik struktur dan elemen struktur sehingga tidak membahayakan keselamatan pengguna struktur bangunan.

Berdasarkan ATC-40 *Performance level* struktur bangunan dibagi menjadi beberapa tingkat kerusakan utama dapat dilihat pada tabel 2 dan gambar 3.

Tabel 2. Tingkat kerusakan struktur berdasarkan ATC-40.

Performance Level	Keterangan
Operational	Pada batasan ini tidak terjadi kerusakan struktural dan non-struktural sehingga struktur bangunan tetap dapat menjalankan fungsinya seperti semula.
Immediate Occupancy	Pada batasan ini tidak terdapat kerusakan struktural tetapi terdapat sedikit kerusakan non-struktural. Perbaikan kerusakan ini dapat dilakukan tanpa mengganggu fungsi dari struktur bangunan tersebut.
Life Safety	Pada batasan ini terjadi kerusakan pada elemen struktur tetapi tidak terjadi keadaan collapse dan masih dapat diperbaiki pada struktur bangunan sehingga masih dapat memberikan kesempatan manusia untuk keluar struktur bangunan.
Structural Stability	Pada batasan ini terjadi kerusakan pada elemen struktur dan bangunan hampir runtuh, elemen penahan gaya lateral sudah collapse, hanya struktur penahan gravitasi saja yang masih utuh. Kemungkinan melukai manusia yang ada didalamnya sangat tinggi jika mencapai batasan ini.



Gambar 3. Kurva Level Kinerja

ATC-40 memberikan batasan rasio drift atap untuk berbagai macam kategori tingkat kinerja struktur pada Tabel 2.

Tabel 3. Tingkat Kinerja Bangunan Gedung Berdasarkan Batas Deformasi (ATC-40).

Tingkat Kinerja				
Batas Simpangan Antar Lantai	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Stability
Simpangan Total Maksimum	0,01	0,01-0,02	0,02	0,33 V_i/P_i
Simpangan Nonelastik Maksimum	0,005	0,005-0,015	No Limit	No Limit

Penentuan tingkat kinerja tersebut sebelumnya harus menggunakan persamaan sebagai berikut:
Maksimal Drift / Simpangan

$$= \frac{D_t}{H} \quad (6)$$

Maksimal Inelastik Drift / Simpangan

$$= \frac{D_t - D_1}{H} \quad (7)$$

Dimana :

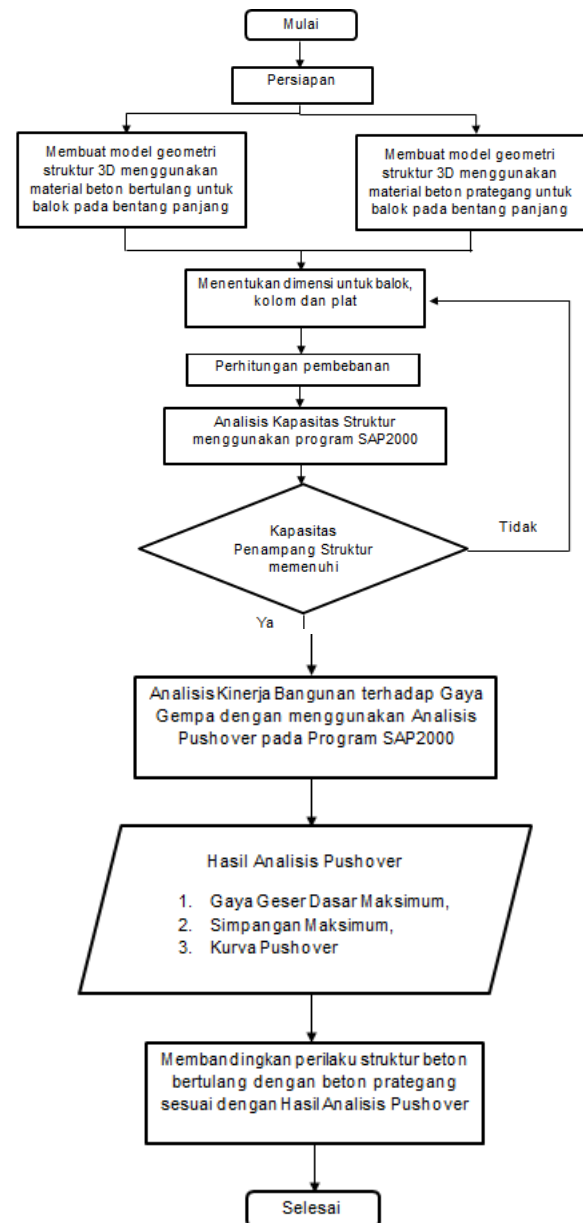
D_t = Simpangan pada lantai atap (m)

D_1 = Simpangan pertama (m)

H = Tinggi total bangunan (m)

Metodologi Penelitian

Langkah-langkah analisis yang akan dilakukan dapat dijelaskan secara singkat melalui bagan pola pikir dibawah ini :



Gambar 4. Bagan pola pikir

Data Struktur

Bangunan direncanakan dengan 2 tipe model yaitu Struktur A dan Struktur B. Struktur A adalah struktur gedung dengan material Beton Bertulang. Struktur B adalah struktur gedung dengan material Beton Prategang pada balok bentang panjang. Bangunan diasumsikan berada di kota Jakarta dengan klasifikasi situs tanah SD (tanah sedang). Struktur gedung terdiri dari 5 lantai dengan fungsi bangunan sebagai perkantoran. Sistem Struktur Penahan

Gempa yang digunakan yaitu Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).

Data-data yang terdapat pada gedung ini adalah sebagai berikut :

1. Konfigurasi Gedung

Tabel 4. Konfigurasi Gedung

No	Lantai	Tinggi Bangunan (m)
1	Base	0
2	Lantai 1	3,5
3	Lantai 2	7
4	Lantai 3	10,5
5	Lantai 4	14
6	Lantai Atap	17,5

2. Mutu Bahan

Mutu beton, f_c' = 30 & 35 MPa

Mutu baja tulangan, f_y = 400 Mpa

3. Data Elemen Struktur

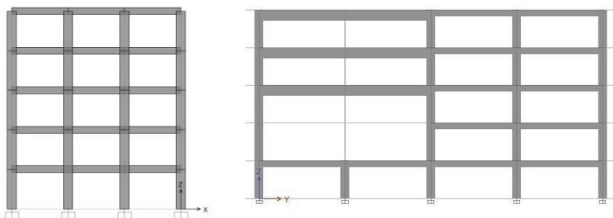
a. Pelat Lantai $t = 120$ mm

b. Balok, tipe balok yang digunakan adalah sebagai berikut:

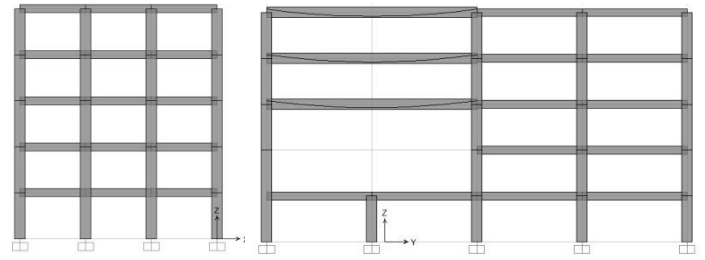
Tabel 5. Tipe Balok

No	Tipe	Dimensi (mm)
1	Balok Induk 1	300 x 600
2	Balok Induk 2	400 x 600
3	Balok Induk 3	500 x 1000
4	Balok Anak	200 x 500
5	Balok Prategang	400 x 800

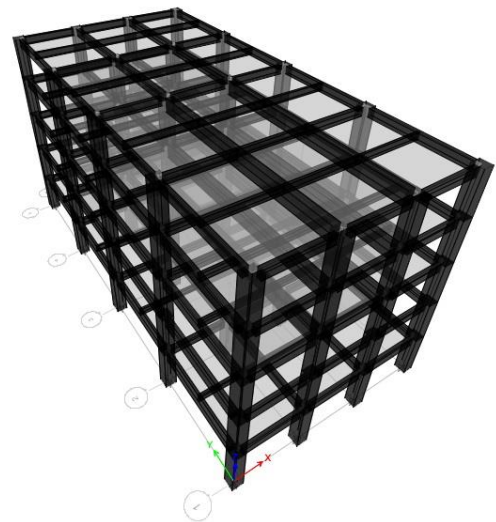
c. Kolom yang digunakan mempunyai dimensi = 800 x 800 mm



Gambar 5. Tampak Struktur A arah x dan arah y



Gambar 6. Tampak Struktur B arah x dan arah y



Gambar 7. Tampak 3D Struktur A & B

Analisis Kinerja Batas Ultimit Struktur

Kinerja batas ultimit struktur gedung ditentukan oleh simpangan dan simpangan antar tingkat maksimum akibat pengaruh gempa rencana dalam kondisi struktur gedung diambang keruntuhan. Hal ini bertujuan untuk membatasi kemungkinan terjadinya keruntuhan struktur gedung yang dapat menimbulkan korban jiwa manusia. Dari hasil analisis pada program SAP2000 diperoleh data simpangan struktur sebagai berikut :

Tabel 6. Tabel Simpangan Bangunan arah X (Struktur A)

Story	δx min m	δx max m	Δx min M	Δx max M
ATAP	0.0127	0.0200	0.0018	0.0030
LANTAI 4	0.0109	0.0170	0.0027	0.0045
LANTAI 3	0.0082	0.0125	0.0033	0.0053
LANTAI 2	0.0048	0.0072	0.0031	0.0050
LANTAI 1	0.0017	0.0022	0.0017	0.0022
BASE	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabel 7. Tabel Simpangan Bangunan arah Y (Struktur A)

Story	δy min m	δy max m	Δy min m	Δy max m
ATAP	0.015	0.015	0.001	0.001
LANTAI 4	0.014	0.014	0.003	0.003
LANTAI 3	0.011	0.011	0.004	0.004
LANTAI 2	0.007	0.007	0.005	0.005
LANTAI 1	0.002	0.002	0.002	0.002
BASE	0.00	0.00	0.00	0.00

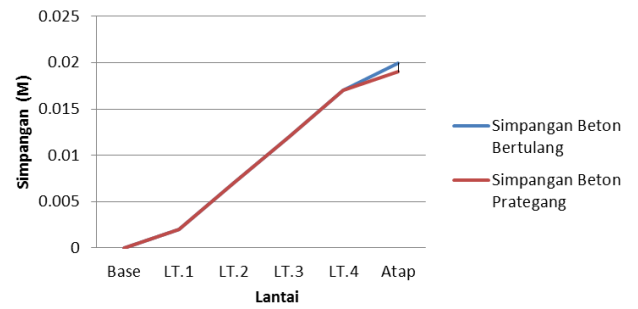
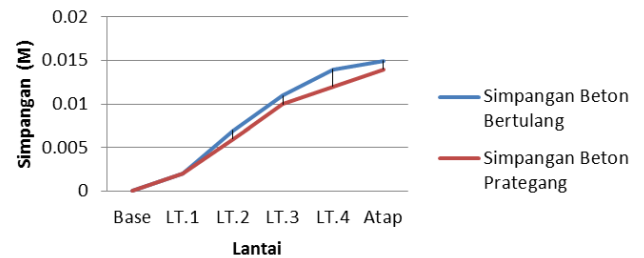
Tabel 8. Tabel Simpangan Bangunan arah X (Struktur B)

Story	δx min m	δx max m	Δx min M	Δx max M
ATAP	0.0123	0.0183	0.0017	0.0016
LANTAI 4	0.0106	0.0167	0.0027	0.0045
LANTAI 3	0.0079	0.0122	0.0032	0.0051
LANTAI 2	0.0047	0.0071	0.0031	0.0049
LANTAI 1	0.0016	0.0022	0.0016	0.0022
BASE	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabel 9. Tabel Simpangan Bangunan arah Y (Struktur B)

Story	δy min m	δy max m	Δy min m	Δy max m
ATAP	0.014	0.014	0.002	0.002
LANTAI 4	0.012	0.012	0.002	0.002
LANTAI 3	0.010	0.010	0.002	0.002
LANTAI 2	0.006	0.006	0.004	0.004
LANTAI 1	0.002	0.002	0.002	0.002
BASE	0.00	0.00	0.00	0.00

Dari Tabel 6 – Tabel 9 diperoleh data berupa grafik sebagai berikut :

**Gambar 8. Grafik Simpangan Maksimum arah X****Gambar 9. Grafik Simpangan Maksimum arah Y**

Pengecekan simpangan izin antar lantai akibat beban gempa arah X dan Y adalah sebagai berikut :

Tabel 10. Pengecekan simpangan izin akibat beban gempa arah X (Struktur A)

n	Story	Elevation (m)	h_i (m)	δx_i (m)	Δx_i (m)	GEMPA ARAH - X		Ket
						$C_d \Delta x_i / l_e$ (m)	Δ_a (m)	
5	ATAP	17.50	3.50	0.020	0.003	0.016	0.070	OK
4	LANTAI 4	14.00	3.50	0.017	0.005	0.027	0.070	OK
3	LANTAI 3	10.50	3.50	0.012	0.005	0.027	0.070	OK
2	LANTAI 2	7.00	3.50	0.007	0.005	0.027	0.070	OK
1	LANTAI 1	3.50	3.50	0.002	0.002	0.011	0.070	OK

Tabel 11. Pengecekan simpangan izin akibat beban gempa arah Y (Struktur A)

n	Story	Elevation (m)	h_i (m)	δy_i (m)	Δy_i (m)	GEMPA ARAH - Y		Ket
						$C_d \Delta y_i / l_e$ (m)	Δ_a (m)	
5	ATAP	17.50	3.50	0.013	0.002	0.011	0.070	OK
4	LANTAI 4	14.00	3.50	0.011	0.002	0.011	0.070	OK
3	LANTAI 3	10.50	3.50	0.009	0.003	0.016	0.070	OK
2	LANTAI 2	7.00	3.50	0.006	0.004	0.022	0.070	OK
1	LANTAI 1	3.50	3.50	0.002	0.002	0.011	0.070	OK

Tabel 12. Pengecekan simpangan izin akibat beban gempa arah X (Struktur B)

n	Story	Elevation	h _i	δX _i	Δx _i	GEMPA ARAH - X		Ket
		(m)	(m)	(m)	(m)	C _d ΔX _i / I _e	Δ _a	
5	ATAP	17.50	3.50	0.019	0.003	0.016	0.070	OK
4	LANTAI 4	14.00	3.50	0.016	0.004	0.022	0.070	OK
3	LANTAI 3	10.50	3.50	0.012	0.005	0.027	0.070	OK
2	LANTAI 2	7.00	3.50	0.007	0.005	0.027	0.070	OK
1	LANTAI 1	3.50	3.50	0.002	0.002	0.011	0.070	OK

Tabel 13. Pengecekan simpangan izin akibat beban gempa arah Y (Struktur B)

n	Story	Elevation	h _i	δY _i	Δy _i	GEMPA ARAH - Y		Ket
		(m)	(m)	(m)	(m)	C _d ΔY _i / I _e	Δ _a	
5	ATAP	17.50	3.50	0.014	0.002	0.011	0.070	OK
4	LANTAI 4	14.00	3.50	0.012	0.002	0.011	0.070	OK
3	LANTAI 3	10.50	3.50	0.010	0.002	0.011	0.070	OK
2	LANTAI 2	7.00	3.50	0.006	0.004	0.022	0.070	OK
1	LANTAI 1	3.50	3.50	0.002	0.002	0.011	0.070	OK

Analisis Level Kinerja Struktur Berdasarkan Code ATC-40

Batasan rasio drift atap yang dievaluasi dengan analisis ragam respons spektrum gedung, dengan parameter maksimum total drift dan maksimum inelastik drift adalah sebagai berikut :

1. Struktur A (Arah X)

Maksimal Drift / Simpangan

$$= \frac{D_t}{H} = \frac{0.02}{17,5} = 0,00114$$

Maksimal Inelastik Drift / Simpangan

$$= \frac{D_t - D_1}{H} = \frac{0,02 - 0,002}{17,5} = 0,000113$$

2. Struktur A (Arah Y)

Maksimal Drift / Simpangan

$$= \frac{D_t}{H} = \frac{0.015}{17,5} = 0,00086$$

Maksimal Inelastik Drift / Simpangan

$$= \frac{D_t - D_1}{H} = \frac{0,015 - 0,002}{17,5} = 0,000074$$

3. Struktur B (Arah X)

Maksimal Drift / Simpangan

$$= \frac{D_t}{H} = \frac{0.019}{17,5} = 0,00108$$

Maksimal Inelastik Drift / Simpangan

$$= \frac{D_t - D_1}{H} = \frac{0,019 - 0,002}{17,5} = 0,000097$$

4. Struktur B (Arah Y)

Maksimal Drift / Simpangan

$$= \frac{D_t}{H} = \frac{0.014}{17,5} = 0,00080$$

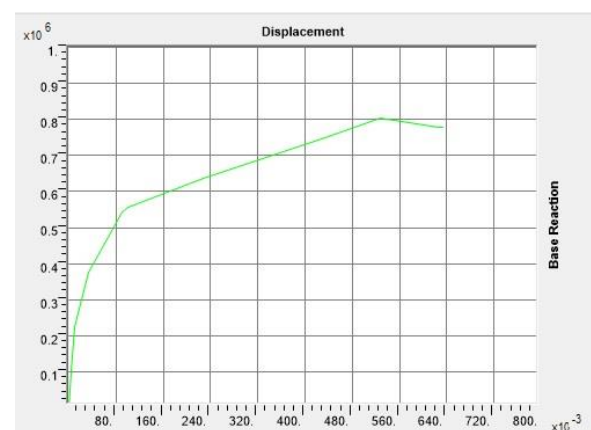
Maksimal Inelastik Drift / Simpangan

$$= \frac{D_t - D_1}{H} = \frac{0,014 - 0,002}{17,5} = 0,000068$$

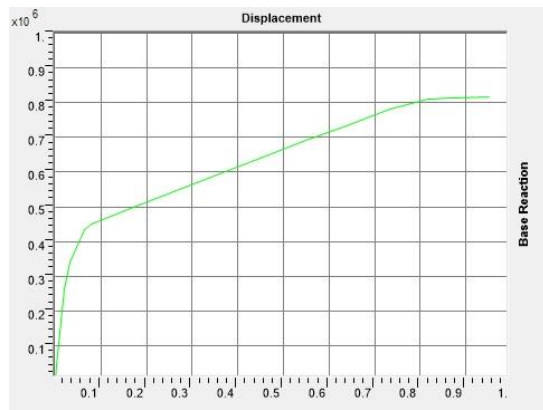
Hasil analisis evaluasi kinerja struktur sesuai dengan *Code ATC-40* menyatakan bahwa Struktur A dan Struktur B pada arah X dan Y, untuk nilai maksimum simpangan dan maksimum inelastik simpangan pada semua struktur termasuk ke dalam kategori level *Immediate Occupancy* (IO) yaitu struktur bangunan aman, resiko korban jiwa dari kegagalan struktur tidak berarti, dan gedung tidak mengalami kerusakan berarti akibat gempa rencana.

Hasil Nonlinear Static Pushover Analysis

Nonlinear Static Pushover Analysis menghasilkan Kurva *Pushover* yaitu kurva yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (V) terhadap perpindahan titik acuan pada atap (D).



Gambar 10. Kurva Pushover Struktur A



Gambar 11. Kurva Pushover Struktur B

Kurva Pushover dipengaruhi oleh pola distribusi gaya lateral yang digunakan sebagai beban dorong. Kurva kapasitas akan memperlihatkan suatu kondisi linier sebelum mencapai kondisi leleh dan selanjutnya berperilaku non-linier.

Dari grafik pada Gambar 10 dan Gambar 11 diperoleh hasil sebagai berikut :

Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD
Unitless	m	Kgf	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
0	3.304E-17	0	1136	0	0	0	0	0
1	0.004813	103679.35	1134	2	0	0	0	0
2	0.010658	225053.89	1054	82	0	0	0	0
3	0.033344	375768.32	896	240	0	0	0	0
4	0.089961	444317.66	836	300	0	0	0	0
5	0.099238	455941.68	800	336	0	0	0	0
6	0.162828	497002.04	732	394	10	0	0	0
7	0.267099	529082.23	622	410	104	0	0	0
8	0.327099	552857.29	608	256	264	8	0	0
9	0.387099	596226.95	608	218	273	37	0	0
10	0.447099	619596.6	608	214	272	42	0	0
11	0.507099	632966.24	608	204	261	63	0	0
12	0.567099	666335.87	608	168	205	155	0	0
13	0.575324	690910.48	608	168	182	174	0	4
14	0.583549	714249.81	606	168	153	197	0	12

Tabel 14. Hasil Nonlinear Static Pushover Analysis (Struktur A)

Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD
Unitless	m	Kgf	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
0	7.535E-08	0	1132	4	0	0	0	0
1	0.003182	45220.06	1128	8	0	0	0	0
2	0.019303	263551.67	1054	82	0	0	0	0
3	0.03068	339669.24	864	272	0	0	0	0
4	0.064936	433600.03	700	436	0	0	0	0
5	0.078807	449696.08	656	480	0	0	0	0
6	0.175389	503085.84	620	516	0	0	0	0
7	0.35268	591974.91	610	360	166	0	0	0
8	0.44768	639597.14	610	226	300	0	0	0
9	0.54268	687219.34	608	172	356	0	0	0
10	0.63768	734591.07	598	168	260	110	0	0
11	0.73268	781393.61	572	124	174	258	0	8
12	0.815805	811531.11	554	126	158	182	0	116
13	0.863305	815032.96	550	130	134	174	0	148
14	0.95	817476.61	548	132	134	170	0	152

Tabel 15. Hasil Nonlinear Static Pushover Analysis (Struktur B)

Dari Tabel 14 dan Tabel 15 diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 16. Simpangan dan Gaya Geser Maksimum Bangunan

Model Bangunan	Simpangan Maksimum (m)	Gaya Geser Dasar Maksimum (kgf)
Struktur A	0,56709	666.335,87
Struktur B	0,63768	734.591,07

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Sistem struktur dengan *soft story* mempengaruhi bangunan bila terjadi gempa karena mengurangi kekakuan struktur, sehingga membutuhkan tingkat kekakuan struktur yang besar untuk dapat memikul gaya aksial dan menyerap energi gempa.
2. Struktur bangunan yang menggunakan material beton bertulang pada balok bentang panjang menerima gaya geser yang besar akibat gempa rencana sehingga terjadi simpangan yang besar juga pada lantai atap.
3. Balok beton prategang dapat meminimalisir gaya geser yang diterima struktur sehingga simpangan pada lantai atap lebih kecil dari pada struktur yang menggunakan material beton bertulang.
4. Balok beton bertulang memerlukan dimensi penampang yang lebih besar agar dapat menerima gaya geser akibat beban gempa rencana sedangkan pada balok beton prategang dimensi penampangnya dapat direduksi karena beton prategang dapat menyerap gaya

gempa lebih baik dari pada beton bertulang.

5. *Nonlinear Static Pushover Analysis* dapat memperkirakan gaya geser maksimum dan deformasi yang terjadi pada struktur bangunan akibat gempa rencana melalui suatu kurva yang dinamakan Kurva *Pushover*.
6. Kurva *Pushover* dapat menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar dengan simpangan maksimal pada atap. Kurva *Pushover* memperlihatkan suatu kondisi elemen struktur bangunan dari tahap elastik menuju kondisi leleh dan selanjutnya berperilaku non-linier hingga runtuh.

Daftar Pustaka

- McCormac, Jack C. 2000. *Desain Beton Bertulang Jilid 1*. Jakarta : Erlangga.
- Nawy, Edward G. 2001. *Beton Prategang-Suatu Pendekatan Mendasar Jilid 1*. Jakarta : Erlangga.
- Pawirodikromo, Widodo. 2012. *Seimologi Teknik & Rekayasa Kegempaan*. Yogyakarta : Pustaka Pelajar
- Antonius & Aref Whidianto. "Efek Soft Story Pada Respon Dinamik Gedung Beton Bertulang Tingkat Tinggi". *Jurnal Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung* Vol. 1, No. 1 (2013).
- Poluraju, P. "Pushover Analysis Of Reinforced Concrete Frame Structure Using SAP2000". *International Journal Of Earth Sciences and Engineering* Vol.4, No.6 (2011)
- Dewobroto, W. "Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan Analisis Pushover Menggunakan SAP2000". *Jurnal Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan* Vol. 1, No.1 (2013).
- SNI 2847:2013. *Peraturan Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan*

Gedung. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.

- SNI 1726:2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- ATC-40:1996. *Seismic Evaluation And Retrofit of Concrete Buildings*. California : California Seismic Safety Commission.

